

Fyzikální praktikum II

Úloha č. 10

Název.: Měření elektrické vodivosti a Hallovy konstanty polovodiče

Měřil.: Michal Švanda.....dne:..1. listopadu 2000.....

odevzdal dne:.....vráceno:.....

odevzdal dne:.....vráceno:.....

odevzdal dne:.....

Posuzoval:.....dne:.....

Výsledek klasifikace:.....

Pracovní úkol

1. Zjistěte závislost proudu vzorkem na přiloženém napětí při nulové magnetické indukci.
2. Zjistěte závislost Hallova napětí na magnetické indukci při dvou hodnotách konstantního proudu vzorkem.
3. Výsledky měření zpracujte graficky a vyhodnoťte měrnou vodivost a Hallovu konstantu vzorku.
4. Vypočtete pohyblivost a koncentraci nositelů náboje.

Teoretický úvod

Elektrická vodivost

Měrná elektrická vodivost σ charakterizuje schopnost látky vést elektrický proud. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru zní:

$$j = \sigma E, \quad [\text{R1}]$$

kde j je hustota elektrického proudu a E intenzita elektrického pole. Označíme-li střední rychlost uspořádaného pohybu elektronu $\langle v_n \rangle$ a děr $\langle v_p \rangle$, koncentraci volných elektronu n a koncentraci děr p , můžeme hustotu proudu vyjádřit vztahem:

$$j = -en \langle v_n \rangle + ep \langle v_p \rangle, \quad [\text{R2}]$$

kde e značí elementární náboj, $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ a protože víme, že náboj elektronu i "díry" (což je fakticky místo, kde chybí elektron) je roven právě e s ohledem na znaménko..

K platnosti Ohmova zákona ve tvaru [R1] je nutné, aby střední rychlosti nábojů byly úměrné intenzitě pole E . Konstanty úměrnosti μ , se nazývají pohyblivosti:

$$\langle v_n \rangle = -\mu_n E, \quad \langle v_p \rangle = \mu_p E \quad [\text{R3}]$$

Potom vodivost můžeme vyjádřit vztahem:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad [\text{R4}]$$

My však budeme zjišťovat měrnou elektrickou vodivost vzorku, kterou lze vypočítat podle vzorce:

$$\sigma = \frac{l}{td} \frac{I_{12}}{U_{34}}, \text{ neboli } I_{12} = \sigma \frac{td}{l} U_{34}, \quad [\text{R5}]$$

kde t , d a l jsou rozměrové parametry vzorku, I_{12} proud procházející vzorkem a U_{34} napětí mezi elektrodami 3 a 4 (viz obr. 1) a s výhodou využijeme regresní analýzy.

Hallův jev

Na náboje pohybující se v materiálu umístěném v magnetickém poli působí Lorentzova síla. Uvažujme nyní vzorek ve tvaru hranolu s kontakty umístěnými podle obr. 1

Magnetická indukce má směr osy z . Uvažujme případ, kdy nosiči nábojů jsou elektrony pohybující se ve směru $-x$. Ve směru $-y$ na ně působí Lorentzova síla o velikosti:

$$F = -e \langle v_n \rangle B \quad [\text{R6}]$$

Vlivem této síly se elektrony odchylují ke stěně v níž je kontakt 5. Tím vznikne příčné elektrické pole o intenzitě ve směru $-y$. K rovnováze elektrické a Lorentzovy síly dojde, když platí:

$$eE_y = e \langle v_n \rangle B \quad [R7]$$

Využijeme-li vztahů [R3], [R1] a [R4], dostaneme při předpokladu, že nositelem náboje jsou elektrony pro napětí mezi kontakty 5 a 6:

$$U_H = E_y d = \frac{1}{en} \frac{IB}{t}, \quad [R8]$$

kde d a t jsou rozměry vzorku a I je proud vzorkem procházející.

Provedené odvození je značně zjednodušené. V praxi se zavádí tzv. Hallův rozptylový faktor r_H vztahem:

$$U_H = r_H \frac{1}{en} \frac{IB}{t} \quad [R9]$$

a zpravidla se liší od jedné (pro naše měření budeme počítat s Hallovým rozptylovým faktorem $r_H = 3\pi/8$).

Hallova konstanta je pak rovna:

$$R_H = \frac{r_H}{en} \quad [R10]$$

Dále lze vypočítat také hallovskou pohyblivost ze vztahu:

$$\mu = R_H \sigma \quad [R11]$$

Zapojení obvodů

Obvod se vzorkem zapojujeme podle *obr. 3*, voltmetr připojujeme buď do zdírek 3 a 4 pro měření vodivosti nebo do zdírek 5 a 6 pro měření Hallovy konstanty. Při měření Hallovy konstanty ještě sestavujeme obvod cívky podle *obr. 3*. Protože elektrody jsou na vzorku jen málokdy napařeny skutečně symetricky, může se i v příčném směru vzorku projevit ohmické napětí. Proto měříme příčné napětí při obou polaritách proudu procházejícího cívku, průměrem obou hodnot dostaneme skutečné Hallovo napětí. K přepínání směru proudu slouží připojený komutátor.

Výsledky měření

Proměřoval jsem vzorek germania, ve kterém převažuje vodivost typu N. Vzorek měl rozměry:

$$l = (7,9 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$d = (3,5 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$t = (0,6 \pm 0,1) \text{ mm}$$

Změřená závislost měřeného napětí mezi kontakty 3 a 4 na proudu protékajícím vzorkem je vynesena do tabulky [T1] a zobrazena v grafu [G1]. Jak je vidět, je závislost velmi přesně lineární, provedená regresní analýza určila hodnotu směrnice (která má význam odporu vzorku) má dle mých měření hodnotu:

$$R = (364 \pm 1) \Omega$$

Hodnotu měrné elektrické vodivosti pak můžeme vypočítat podle vztahu [R5].

$$\sigma = (10 \pm 2) \text{ S/m}$$

V tabulce [T2] jsou zaneseny hodnoty měření Hallova napětí pro dva konstantní proudy procházející vzorkem - pro $I = (2,0 \pm 0,1) \text{ mA}$ a $I = (5,0 \pm 0,1) \text{ mA}$. Výsledky jsou zaneseny v grafu [G2].

Ještě před zapojením cívky do obvodu (kdy byl tedy vzorek umístěn v nulovém magnetickém poli) již bylo možné registrovat na voltmetru nenulové napětí, které mělo původ právě v ohmickém napětí.

Magnetickou indukci jsem určoval podle empirického vztahu dodaného k úloze:

$$B[T] = 0.115 \cdot I[A]$$

Lineární regrese a následné výpočty podle vzorce [R9] stanovily hodnotu koncentrace n nositelů náboje na:

$$\text{pro proud } I=(2,0\pm 0,1) \text{ mA: } n=(3,3\pm 0,6)\times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{pro proud } I=(5,0\pm 0,1) \text{ mA: } n=(3,4\pm 0,6)\times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

Obě hodnoty si odpovídají v rámci svých experimentálních chyb, což je ve shodě s teorií.

Dle vzorce [R10] jsem vypočítal Hallovu konstantu R_H :

$$\text{pro proud } I=(2,0\pm 0,1) \text{ mA: } R_H=(0,022\pm 0,004) \Omega T^{-1}$$

$$\text{pro proud } I=(5,0\pm 0,1) \text{ mA: } R_H=(0,022\pm 0,004) \Omega T^{-1}$$

I tyto dva údaje si odpovídají.

Podle vzorce [R11] dopočítám Hallovu pohyblivost:

$$\text{pro proud } I=(2,0\pm 0,1) \text{ mA: } \mu=(0,22\pm 0,06)\times 10^{-4} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$$

$$\text{pro proud } I=(5,0\pm 0,1) \text{ mA: } \mu=(0,22\pm 0,06)\times 10^{-4} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$$

Diskuse

Veškeré výsledky odpovídají naší teoretické představě o vedení elektrického proudu polovodičem umístěném mimo i v magnetickém poli. Naměřené hodnoty umožnily stanovit závislost napětí na polovodiči na protékajícím proudu, což nám umožnilo poznat, že se polovodič chová jako lineární prvek, tedy že má vlastnosti odporu. Podařilo se mi prokázat, že při umístění polovodiče to magnetického pole dojde k tzn. Hallovu jevu a kvalitativně i kvantitativně zjistit jeho vlastnosti. Podařilo se mi ukázat, že závislost Hallova napětí na přiložené magnetické indukci je lineární a že tzn. Hallova konstanta nezávisí na proudu protékajícím polovodičem.

Všechny hodnoty jsou zatíženy obrovskou experimentální chybou, která má svůj hlavní původ ve stanovení rozměru vzorku, který sám byl změřen s 17% chybou. Tato chyba se pak odráží na všech ostatních výpočtech.

Závěr

Podařilo se mi stanovit měrnou elektrickou vodivost daného vzorku a stanovit vlastnosti Hallova jevu.

Literatura

[L1] RNDr. R. Bakule, RNDr. J. Šternberk - Fyzikální praktikum II.

[L2] J. Brož - Základy fyzikálních měření I.

Poznámky:

Veškeré zde uvedené chyby jsou chybami statistickými na hladině σ , jejich původ je ve většině případů v chybách přístrojových.

Grafy a závislosti byly vytvářeny programem Origin 5.0.